Où est la place de l'être humain dans un système ayant comme tendance à se suffire à lui-même ?

À travers les différents exemples cités à la suite de cette introduction, l'objectif de cet exercice sera de comprendre comment l'humain peut retrouver sa place dans un environnement où les machines à commande numérique (CNC) reproduisent, voire surpassent, chacun des gestes de l'artisan. Ces machines, qui servent aussi bien à produire des biens de grande consommation qu'à créer des œuvres uniques, interrogent notre rapport à la pratique manuelle et à notre propre rôle dans le processus créatif.

Ce mémoire aurait pu aborder des thématiques telles que l'intelligence artificielle et l'avenir de l'être humain dans un monde où une entité non biologique, bien plus efficace, est désormais capable de rédiger et de comprendre une vaste quantité de connaissances humaines. Cependant, j'ai choisi de m'orienter vers une réflexion plus précise : notre relation à la pratique artisanale et la manière dont les machines, pilotées par ordinateur, se positionnent face à l'humain. La machine devient-elle un maître imposant ses propres limites et exigences, ou demeure-t-elle un simple esclave, au service de la créativité humaine ?

En y réfléchissant, il est essentiel de rappeler que, dans leur essence, les machines ne sont que des outils composés d'un ensemble de moteurs et d'autres mécanismes physiques. Ces éléments sont contrôlés par une carte mère, elle-même dictée par une succession de commandes informatiques programmées dans un logiciel. Si cette vision mécanique peut sembler froide et purement fonctionnelle, elle cache pourtant une interaction complexe entre l'intelligence humaine, la logique algorithmique et les capacités physiques de la machine.

Mais au-delà de l'aspect technique, ce type de machine questionne profondément la place de l'artisan dans le processus de création. Jadis, l'artisan avait un contrôle direct sur chaque étape de la fabrication : le choix des matériaux, les gestes précis, et même les imprévus du processus, qui contribuaient à la singularité de chaque pièce. Avec les machines CNC et les imprimantes 3D, ces gestes sont remplacés par des algorithmes et des mouvements standardisés. L'artisan, autrefois au centre du processus, devient souvent un opérateur, ajustant des paramètres ou surveillant le bon déroulement d'un programme.

Cela soulève des questions philosophiques et pratiques : l'artisan perd-il son essence dans cette transition vers la production numérique ? Ou bien, au contraire, son rôle évolue-t-il pour devenir celui d'un concepteur et d'un programmeur, utilisant les machines comme une extension de sa créativité ? Dans cette perspective, les machines à commande numérique pourraient être vues non pas comme des remplaçantes, mais comme des partenaires, ouvrant de nouvelles possibilités créatives tout en posant des défis éthiques et techniques.

Pour commencer à répondre à cette problématique, il est fondamental d'expliquer comment fonctionnent ces machines. Prenons, par exemple, les imprimantes 3D utilisant la technologie FDM (Fused Deposition Modeling). Ces machines, parmi les plus accessibles et polyvalentes, permettent de produire des objets en superposant des couches successives de matériau fondu, généralement du plastique. Ce procédé repose sur un système de données cartésienne appeler orthonormé, dicté par des fichiers numériques appelés G-code, qui traduisent les instructions du concepteur en actions mécaniques. Revenons à l'essence même de ce qu'est une imprimante FDM et l'espace dans lequel elle évolue appeler espaces orthonormés.

Les Espaces Orthonormés et l'empilement de dimension

La notion d'espace orthonormé, introduite par Descartes au XVIIe siècle, a révolutionné la manière dont l'espace physique est représenté et compris. Cette notion repose sur un système de coordonnées qui permet de représenter un espace tridimensionnel à l'aide de trois axes perpendiculaires : X, Y, et Z. Ces axes définissent trois plans fondamentaux :

Le plan XY, qui représente les directions horizontales et une profondeur.
Le plan XZ, qui inclut la profondeur et une direction verticale.

Le plan YZ, qui représente la direction horizontale et une direction verticale.

Le plan XY représente la surface sur laquelle le filament est déposé, à l'image d'une feuille de papier sur laquelle on dessinerait. Chaque arrêt du crayon sur cette feuille correspond à un point défini par deux coordonnées : X et Y. Ce plan est essentiel pour comprendre le déplacement de la buse d'impression en deux dimensions.

En complément, les deux autres plans permettent de visualiser l'objet dans l'espace en trois dimensions. Le plan XZ représente la face avant de l'objet, tandis que le plan YZ correspond à la vue de côté. Ces plans permettent ainsi d'appréhender la position des différentes couches et d'interpréter les mouvements de la machine selon les trois axes : X (gauche-droite), Y (avant-arrière) et Z (haut-bas).

Prenons l'exemple de deux points dans un plan 2D :

- (1,0,0) : Ici, la direction pointe uniquement vers l'axe X, indiquant une profondeur sans mouvement vertical ou en horizontal.
- (0,1,0) : Ici, la direction pointe uniquement vers l'axe Y, indiquant une position horizontale sans mouvement vertical ou en profondeur.

Lorsque plusieurs points sont reliés entre eux, cela forme une polyligne, qui est une suite de segments droits connectés. Cette polyligne peut être vue comme un parcours dans l'espace. Dans le cadre des machines-outils, ce parcours devient une trajectoire que la tête de l'outil doit suivre pour effectuer une tâche spécifique, comme découper, graver ou imprimer.

Les machines-outils modernes, comme les fraiseuses CNC ou les imprimantes 3D, utilisent des systèmes très avancés, intégrant des couches logicielles complexes pour optimiser leurs performances en termes de vitesse, de précision et de répétabilité. Cependant, leur fonctionnement fondamental reste relativement simple :

1. Trois moteurs linéaires contrôlent les mouvements de la tête d'outil selon trois axes orthonormés (X, Y, Z).
2. Des axes X et Y permettant les déplacements dans un plan 2D, tandis que l'axe Z ajoute la troisième dimension, permettant de travailler en volume.
3. Chaque point du parcours d'outil correspond directement à un certain nombre de tours effectués par les moteurs des axes respectifs.

Pour créer une forme tridimensionnelle, les parcours d'outil 2D sont **empilés** les uns sur les autres selon l'axe Z. Chaque parcours de la tête représente une section horizontale de l'objet. La superposition progressive des parcours forme un volume complet.

Ce principe est particulièrement visible dans des technologies comme l'impression 3D par dépôt de matière fondue, où chaque couche est imprimée successivement pour donner naissance à une pièce.

François Willème, Inventeur de la Photosculpture

François Willème, l'inventeur de la photosculpture, a présenté cette innovation remarquable lors de l'Exposition universelle de 1867.

La photosculpture est un procédé novateur qui permet de reproduire une sculpture de manière relativement fidèle grâce à une série de photographies prises sous différents angles autour de l'objet. Chaque photographie capture le profil de la sculpture à partir d'une perspective spécifique. Une fois ces photos prises, leurs contours sont extraits pour générer une série de plans en deux dimensions. Ces plans sont ensuite assemblés côte à côte, en suivant l'ordre et l'orientation des photographies, afin de reconstruire un volume tridimensionnel représentant fidèlement la sculpture originale.

Ce processus ingénieux constitue l'un des précurseurs des technologies modernes d'impression 3D, en posant les bases conceptuelles de la fabrication de formes complexes par l'accumulation de couches successives. Plus largement, il illustre une étape fondatrice dans l'histoire de la fabrication additive.

Les méthodes de conceptions des parcours d'outils

L'élément clé de ces machines réside dans la manière dont les points qui composent le parcours sont définis et agencés. Cela peut se faire de deux procédés :

Automatisé : Grâce à un logiciel spécialisé qui génère automatiquement les parcours d'outil à partir d'un modèle 3D. Ces logiciels intègrent souvent des algorithmes d'optimisation pour réduire les temps de parcours ou améliorer la qualité de la pièce.

Manuel : Dans certains cas, un concepteur ou un opérateur qualifié peut définir et ajuster directement les parcours d'outil. Cette méthode offre une grande liberté et permet de répondre à des besoins très spécifiques, comme la création de formes complexes ou artistiques.

En automatisation de l'impression 3D, on utilise des logiciels appelés **slicers**, dont la fonction principale est de convertir un modèle 3D en une série de couches planes superposées, correspondant à des tranches successives dans le plan XY. Cette opération est essentielle, car elle permet de traduire un objet numérique en instructions exploitables par l'imprimante, qui procédera alors à l'extrusion du matériau couche par couche jusqu'à la formation complète du modèle physique.

À l'inverse, une approche manuelle du tranchage repose sur l'utilisation de logiciels alternatifs qui n'automatisent pas entièrement le processus. Dans ce cas, il revient à l'utilisateur de définir plus précisément la stratégie d'impression, en reconstruisant lui-même la logique du parcours de fabrication. Cette méthode demande une compréhension approfondie du comportement de l'imprimante et des caractéristiques du matériau utilisé, car elle permet d'optimiser certains aspects qui peuvent être limités par les algorithmes des slicers classiques.
En maîtrisant ces deux étapes, il est possible de transformer une simple suite de points en un processus précis et efficace, générant des objets tangibles, qu'il s'agisse de composants techniques, d'œuvres d'art, ou encore de prototypes industriels. La véritable magie de ces procédés réside donc dans l'intelligence avec laquelle ces points sont arrangés et exploités.

L'histoire de l'impression 3D et les perspectives qui l'accompagnent

L'histoire de l'impression 3D commence avec la création du projet **RepRap** (Replicating Rapid Prototyper), un projet Open Source visant à concevoir une machine capable de déposer de la matière plastique sur un plateau pour créer des volumes par superposition de couches successives. Ce projet portait une vision presque utopique : celle d'une machine capable de s'auto-répliquer. Cette idée a attiré l'attention de nombreux chercheurs, notamment dans le domaine de la réplication moléculaire et atomique, où des parallèles intéressants peuvent être établis.

Une comparaison entre la réplication moléculaire et l'impression 3D permet de mieux comprendre leurs similitudes. Par exemple, dans *Developing Insights into the Design of the Simplest Self-Replicator (SSR) and its Complexity*, les Réplicateurs Auto-Suffisants Simplifiés (RAS) sont décrits comme nécessitant une **entrée de matière première** pour se répliquer et une **sortie pour évacuer les déchets**. De plus, un RAS doit posséder des plans internes pour créer ses propres composants, des capacités avancées pour reproduire ces plans, ainsi qu'un système de surveillance et de contrôle de ses processus de fabrication. L'impression 3D, bien que différente dans son application, partage certains principes avec les RAS. Cette technologie nécessite également une **entrée de matière première** et produit des **déchets résiduels** lors de l'impression. Elle peut intégrer les plans de fabrication pour recréer certaines de ses propres pièces. Cependant, les composants métalliques et électroniques de ces imprimantes doivent encore être fournis de l'extérieur. Grâce à des technologies de vision comme les caméras, les scanners Lidar et l'intelligence artificielle, les imprimantes 3D peuvent surveiller leurs processus et effectuer des ajustements autonomes pour résoudre les problèmes détectés.

Cette comparaison met en lumière les avancées nécessaires pour qu'une imprimante 3D devienne une machine totalement Auto-Répliquant. Bien qu'elle ne soit pas encore aboutie, cette technologie montre, dès ses débuts, un potentiel prometteur pour transformer les méthodes de production.

Un exemple emblématique est celui de **Joseph Prusa**, l'un des pionniers de l'impression 3D et membre du projet RepRap. Prusa est le créateur de l'imprimante **Prusa Mendel**, qui a marqué une étape importante dans l'histoire de l'impression 3D. Aujourd'hui, Prusa Research est l'un des leaders du marché de l'impression 3D grand public, offrant une preuve éclatante du potentiel de cette technologie. Une particularité fascinante : les imprimantes Prusa sont elles-mêmes partiellement produites à l'aide d'autres imprimantes 3D Prusa. Ce concept illustre parfaitement l'avenir possible de l'impression 3D : une technologie qui pourrait un jour s'autoproduire, tout en incarnant le futur de la fabrication et de l'usine décentralisée. Ainsi, l'impression 3D, bien qu'encore imparfaite en tant que système auto-répliquant, se positionne comme une technologie révolutionnaire avec des perspectives intéressantes pour l'avenir.

Croisement entre la pratique du dessin, la conception manuelle de parcours et la pensée de Richard Sennett dans *Ce que sait la main*

Dans *Ce que sait la main*, Richard Sennett explore le rôle essentiel de la main dans la création et le savoir-faire, soulignant l'importance d'un dialogue entre le concepteur et la matière. Cette réflexion trouve une résonance particulière dans le contexte de la fabrication numérique, où l'automatisation tend parfois à remplacer cette interaction subtile par des règles mathématiques strictes. Si ces règles optimisent les processus et ouvrent de nouvelles possibilités, elles risquent également d'aliéner le concepteur en l'éloignant de l'essence humaine de la création.

L'automatisation des parcours d'outil, qu'il s'agisse d'un logiciel de slicing ou de commandes générées par des algorithmes, impose des contraintes qui peuvent brider la créativité. En déléguant la conception des trajectoires à des systèmes numériques, le concepteur s'expose au risque de perdre le contrôle sur les subtilités du geste, au profit d'une standardisation qui peut produire des objets fonctionnels mais dénués d'âme. Cette distance entre l'idée initiale et l'objet final déshumanise en partie le processus de création, rendant l'œuvre plus utilitaire qu'expressive. À l'inverse, la pratique du dessin et la conception manuelle de parcours d'outil permettent de rétablir un équilibre entre l'humain et la machine. Le dessin, qu'il soit analogique ou numérique, engage directement la pensée et l'intention de l'artiste. Il ne s'agit pas seulement de tracer une forme, mais de dialoguer avec elle, d'explorer ses tensions, ses contraintes et ses possibilités. De même, concevoir un parcours manuellement exige une compréhension intime de la machine et de la matière, une attention aux détails qui redonne au créateur le rôle de médiateur entre le virtuel et le tangible. Cette approche artisanale numérique rejoint la pensée de Sennett : la main et la machine, en collaboration, peuvent produire des objets qui reflètent à la fois la rigueur de l'automatisation et la chaleur de l'intention humaine. Ainsi, même dans un projet assisté par des outils numériques avancés, la quête doit rester centrée sur l'amélioration de la vie humaine. Lorsque l'automatisation devient un simple moyen d'exprimer une vision créative plutôt qu'un cadre rigide, elle permet de réaliser des objets qui transcendent leur utilité pour raconter une histoire, éveiller une émotion ou répondre à des besoins profonds. En intégrant ces deux dimensions : La logique mathématique des outils numériques et la sensibilité propre à l'humain, il devient possible de créer des objets qui ne sont pas seulement des produits, mais des témoignages de ce que la technologie peut offrir à la condition humaine. L'automatisation, loin d'être une menace, peut ainsi devenir un outil au service de la créativité, pour peu qu'elle reste un prolongement de la main plutôt qu'un substitut.

Comment le parcours devient une intention artistique

La création de parcours manuels, bien que plus exigeante, offre une opportunité précieuse de comprendre en profondeur les formes des objets qui nous entourent. Contrairement aux parcours automatisés générés par des logiciels, les parcours manuels permettent aux concepteurs de s'immerger dans le processus de fabrication, transformant chaque trajectoire en une intention artistique réfléchie.

Dirk van der Kooij illustre parfaitement cette approche dans ses œuvres, où le mouvement de la machine devient une partie intégrante de l'esthétique finale. Sa chaise *Chubby*, conçue en 2012, en est un exemple emblématique. Cette pièce, exposée dans les collections permanentes du Vitra Design Museum et du Design Museum de Londres, révèle chaque étape du parcours de la machine. Le processus de fabrication, autrefois dissimulé, devient ici une composante esthétique essentielle. Chaque segment, chaque couche déposée par la machine contribue à une narration visuelle où la méthode de conception et de fabrication n'est plus un secret, mais le cœur même de l'objet.

Dans un registre différent, le *Wandel bowl* de 2024 explore une facette plus abstraite et poétique de l'impression 3D tout en conservant sa fonction initiale. Fabriqué à partir de plastique recyclé, ce bol, avec ses lignes ondoyantes et ses couleurs changeantes, se situe à mi-chemin entre une sculpture et un objet utilitaire. Contrairement à la *Chubby*, qui célèbre la rigueur et la précision du processus mécanique, le *Wandel bowl* adopte une approche plus libre et fluide. Son parcours de fabrication devient une exploration artistique des possibilités offertes par la 3D, où chaque ligne imprimée raconte une histoire et où la matière semble évoluer de manière organique.

Ces deux œuvres, bien que différentes, mettent en lumière la manière dont le parcours peut devenir une intention artistique. Dans la *Chubby*, le parcours célèbre le geste mécanique et la structure rigoureuse ; dans le *Wandel bowl*, il s'épanouit dans une esthétique ludique et organique. Ensemble, elles montrent comment l'impression 3D peut transcender ses origines techniques pour devenir un langage de design, où la machine, guidée par l'artiste, trace une narration à travers chaque couche déposée.

Outre ça capacité à produire une nouvelle forme d'esthétique l'impression 3D propose une proto forme d'automatisation industrielle pour les designers leurs permettent de produire des moyennes séries de leurs pièces sans faire appel à des sous traitant.

Les parcours manuels comme laboratoire de recherche

La réalisation de pièces imprimées en 3D est traditionnellement assistée par des logiciels de tranchage (*slicers*) dits classiques. Cependant, une nouvelle pratique émerge : la conception manuelle des parcours de la machine. Cette approche permet de repousser les limites des usages conventionnels en explorant des solutions innovantes.

L'une des principales contraintes du procédé FDM (Fused Deposition Modeling)

Réside dans l'impossibilité d'imprimer dans le vide : chaque couche doit impérativement se reposer sur la précédente. L'expérimentation manuelle des parcours offre des solutions de plus en plus prometteuses pour contourner cette limite.

Un exemple illustrant l'importance de cette approche est l'émergence de la notion de non-planaire dans le domaine de l'impression 3D. Traditionnellement, l'impression FDM fonctionne en ajoutant des couches successives sur l'axe Z, couche par couche. La notion de non-planaire, en revanche, permet de modifier la valeur de Z en continu, créant ainsi des trajectoires tridimensionnelles variable plus complexes et ouvrant de nouvelles possibilités en matière de design et de fabrication.

Une autre approche se propose pour palier à cette contrainte consiste à incliner la tête d'impression pour compenser la gravité et le projet open5x en est le parfait exemple.

Open5x

Le projet Open5x, une initiative Open Source développée par quatre étudiants en ingénierie au London College. Ce projet vise à modifier une imprimante Prusa i3 en lui ajoutant deux axes de rotation au niveau de la tête d'impression. Cette modification permet de repositionner dynamiquement le plan de dépôt de matière, contrecarrant ainsi les effets de la gravité tout en préservant la qualité d'impression. Bien que cette technologie offre une solution intéressante à certaines contraintes, elle rend l'utilisation de slicer conventionnels inapplicables. Pour répondre aux exigences des systèmes modifiés comme Open5x, plusieurs outils et méthodes se distinguent :

1. Conception avec Rhinocéros 3D et Grasshopper

Rhinocéros 3D est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) surfacique, particulièrement adapté pour la modélisation de formes complexes, contrairement aux logiciels volumiques souvent privilégiés pour les pièces mécaniques.

Grâce à sa communauté d'utilisateurs, Rhinocéros 3D bénéficie de nombreuses extensions développées via son code source ouvert. Parmi elles, **Grasshopper** se distingue comme une interface de conception par programmation visuelle, idéale pour le prototypage rapide d'algorithmes.
Dans le cadre d'Open5x, Grasshopper permet de concevoir et de tester les nouveaux parcours et commandes intégrant deux axes supplémentaires. Cette approche favorise la rapidité et l'interactivité grâce à une vérification visuelle directe par le développeur.
Rédigé et ajouter des exemples

2. Développement classique

Les langages tels que **C#** ou **Python**, largement utilisés en robotique, permettent un développement optimisé, l'intégration de bibliothèques externes, et une meilleure personnalisation.

Toutefois, cette méthode est plus laborieuse, nécessitant notamment la création d'une interface visuelle pour valider les parcours. Cela implique un investissement de temps plus important.

Ces deux méthodes ne sont pas opposées mais complémentaires :

Grasshopper excelle dans la phase de maquettage, en identifiant et anticipant les problèmes potentiels grâce à son interface intuitive et visuelle. Le **développement classique**, en revanche, s'impose comme une étape essentielle pour concevoir des logiciels stables, performants, et pleinement adaptés aux besoins spécifiques.

Les parcours manuels, associés à des outils tels que Grasshopper et des langages de programmation avancés, transforment l'impression 3D en un véritable laboratoire de recherche. Ces innovations, à l'intersection de la conception algorithmique et des systèmes mécaniques, repoussent les limites du FDM traditionnel. Les logiciels près conçus par l'industrie pourraient laisser penser que ce fier à eux nous permet plus de liberté et facilité d'utilisation mais avec les exemples qui vont suivre nous allons vite comprendre que rien ne prévôt sur la connaissance profonde de l'usager dans l'outils qu'il manipule, tels un menuisier sachant tout aussi bien utiliser son ciseau à bois pour tailler le bois que pour l'affuter. Alors que pourtant le ciseau à bois est fait d'acier un matériau que le menuisier n'est pas censé connaitre et pourtant on observe ces sortes de pratiques annexes d'un métier qui pourtant élève un travail au rang d'artisanat. Si nous mettons en parallèles l'artisanat et les outils de production numérique, on comprend que les deux pratiques ont chacune besoins de se construire leurs propres outils pour compenser l'inexactitude humaine.

Full control XYZ

Pendant la pandémie de Covid-19, une situation d'urgence est survenue, nécessitant la production massive de visières destinées à protéger le personnel médical travaillant dans les hôpitaux. Face à cette demande urgente, l'impression 3D s'est rapidement révélée être le procédé le plus adapté pour répondre efficacement aux besoins en termes de rapidité et de flexibilité. Cependant, dès les premières séries d'impression, un problème majeur a émergé : comment réduire significativement le temps consacré au post-traitement des pièces imprimées, qui ralentissait considérablement la chaîne de production.

C'est dans ce contexte que la solution **XYZ Full Control** a joué un rôle crucial. Contrairement aux trancheurs traditionnels, qui ne permettent pas une optimisation précise des parcours d'impression pour minimiser le travail de post-traitement, cette méthode avancée offre un contrôle total sur la trajectoire de la buse. Cela a permis de réduire les défauts liés à l'impression et de positionner les éventuelles imperfections dans des zones stratégiques et non critiques, facilitant ainsi leur traitement ou leur élimination.

Cette approche, qui repose sur une compréhension approfondie du processus d'impression 3D et sur des algorithmes sophistiqués de génération de GCode, a permis d'augmenter la productivité de manière spectaculaire. La production d'impressions a été multipliée par 400 %, tandis que le temps de post-traitement a été drastiquement réduit, démontrant l'efficacité de cette innovation dans un contexte industriel et d'urgence sanitaire.

Tissue Scaffolds with Hollowed Features

Le document *Tissue Scaffolds with Hollowed Features* propose une méthode innovante de remplissage en 2D, conçue pour réduire de manière significative les déplacements inutiles entre différentes zones de remplissage et pour intégrer les contraintes mécaniques exercées par la matière dans l'adaptation des trajectoires. Cette méthodologie permet d'optimiser les parcours en fonction des spécificités des matériaux, tout en maintenant une continuité et une efficacité accrues dans les processus d'impression. La première étape repose sur l'utilisation d'un diagramme de Voronoï, un outil mathématique sophistiqué permettant de diviser des géométries complexes en cellules discrètes et homogènes. Cette segmentation rend possible l'attribution de propriétés variées à chaque région, telles que la densité ou la composition des matériaux, tout en modélisant des espaces aux formes complexes, comme ceux observés dans les structures cristallographiques. Les diagrammes de Voronoï jouent également un rôle clé dans l'optimisation des trajectoires d'impression ou de découpe, garantissant des transitions fluides et homogènes entre les différentes zones. La seconde étape consiste à analyser les contraintes générées par la matière lors du processus d'impression et à ajuster le diagramme de Voronoï pour neutraliser ces effets. Cette adaptation permet de concevoir des trajectoires les plus continues possible en s'appuyant sur des algorithmes spécifiques qui réduisent au maximum les déplacements inutiles. La dernière étape consiste à imprimer une trajectoire en spirale, soigneusement définie entre les couches optimisées, afin d'assurer une transition fluide et progressive des propriétés des matériaux au sein de la structure. Ce document illustre également la puissance du duo formé par la conception procédurale, notamment à travers des outils tels que Grasshopper, et l'impression 3D lorsqu'ils sont intégrés dans une démarche de recherche. Cette synergie accélère considérablement les cycles d'expérimentation en facilitant des interactions dynamiques et réactives entre la théorie et les tests pratiques.

Ces deux exemples illustrent de manière significative que l'intervention humaine, ainsi que sa capacité à apporter un regard singulier construit par des expériences antérieures et le croisement de différentes disciplines scientifiques, joue un rôle essentiel dans l'optimisation des automatismes informatiques. Ces derniers, bien que sophistiqués, ne sont finalement que l'aboutissement d'un empilement de recherches et de connaissances humaines accumulées au fil du temps. En d'autres termes, l'intelligence des machines est directement issue de l'intelligence collective des générations passées et présentes, ce qui signifie que leur efficacité dépend toujours, en grande partie, de l'expertise et de la créativité humaines.

Prenons l'exemple concret des visières de protection conçues durant la crise sanitaire. Dans ce cas précis, des chercheurs et ingénieurs ont développé une interface permettant à l'utilisateur de guider la génération de parcours d'impression en fonction de son intuition et de son retour d'expérience. Ce dispositif ne se limite donc pas à une automatisation brute, mais met en avant l'importance de l'interaction entre l'humain et la machine. En effet, les premiers essais de génération automatique avaient révélé des limitations et des problématiques techniques qui n'avaient pas été anticipées par les algorithmes. L'intervention humaine s'est alors avérée cruciale pour affiner le processus, ajuster les paramètres et corriger les erreurs que la machine seule n'aurait pas pu percevoir.

Le fait que, malgré les avancées technologiques, l'automatisation nécessite encore aujourd'hui une implication humaine significative. Plus les outils numériques seront conçus pour encourager cette collaboration entre « être biologique » et « être mécanique », plutôt que de chercher à développer des systèmes autonomes totalement fermés et inaccessibles, plus nous serons en mesure de construire des solutions véritablement adaptées aux besoins humains et durables dans le temps.

Il est donc essentiel de penser la place de l'humain dans la conception et l'utilisation des technologies numériques. Plutôt que de voir l'automatisation comme un processus visant à remplacer l'homme, il serait plus pertinent de l'envisager comme un levier permettant de renforcer son efficacité, sa créativité et sa capacité à résoudre des problèmes complexes. Cette approche collaborative ouvre la voie à des outils hybrides, où l'intelligence artificielle et les systèmes automatisés ne sont plus perçus comme des concurrents de l'intelligence humaine, mais comme des partenaires capables d'amplifier nos capacités et d'améliorer nos pratiques.

Ainsi, l'avenir de l'automatisation ne réside pas dans la suppression totale de l'intervention humaine, mais plutôt dans l'élaboration de solutions qui intègrent pleinement l'expertise, le jugement et la sensibilité des utilisateurs. Cette synergie entre l'homme et la machine représente un enjeu majeur pour les décennies à venir, et son succès dépendra de notre capacité à concevoir des technologies qui favorisent la complémentarité plutôt que la substitution.

Une nouvelle génération d'objet superflu ?

L'impression 3D est le premier objet technique capable de produire des biens tout en ayant le potentiel de s'intégrer dans tous les foyers. Cette technologie est-elle alors un outil émancipateur ou simplement un gadget permettant de fabriquer d'autre gadget ?

Depuis la démocratisation de l'impression 3D, de nombreuses plateformes ont vu le jour, offrant à chacun la possibilité de partager ses modèles à imprimer. Bien que née d'une initiative open source, cette pratique montre déjà certaines dérives : la réplique d'objets décoratifs banals ou futiles, où la valeur intrinsèque de l'objet (son coût environnemental, social et en ressources) est souvent éclipsée. Ce coût, normalement reflété par le prix de l'objet, est ici remplacé par une accessibilité illimitée et gratuite.

William Morris définissait l'ersatz comme un objet produit par le capitalisme naissant : à mesure que l'industrialisation augmentait les capacités de production, elle engendrait également des copies pâles et standardisées d'objets autrefois créés par des artisans et designers talentueux. Cette analyse trouve un écho dans la démocratisation du plastique, une problématique aujourd'hui étroitement liée à l'essor de l'impression 3D.

Nous faisons face à une question : l'impression 3D peut être un vecteur d'innovation, de réparation et, par extrapolation, un levier d'émancipation humaine. Mais elle risque aussi de se transformer en une boîte magique, capable de répondre instantanément à nos désirs, souvent non essentiels.

Prenons l'exemple de la plateforme Thingiverse : on y trouve une multitude d'objets à imprimer, tels que le *Cute Mini Octopus*, téléchargé plus de 80 000 fois. Ce petit poulpe mignon représente à lui seul près de 2 tonnes de plastique consommées. Plus la technologie simplifie l'utilisation des imprimantes, plus elle éloigne les utilisateurs de l'impact réel de leurs actions. Par exemple, les machines proposées par des fabricants comme Bambu Lab. Aujourd'hui leaders du marché, encouragent une utilisation déresponsabilisée grâce à leur simplicité.

Derrière son apparence ludique, elle dissimule une réalité bien plus complexe, ancrée dans l'industrialisation et portée par la plasturgie. Cette industrie, loin d'être un simple acteur passif, ne fait que répondre aux besoins des consommateurs : produire des objets conformes aux normes européennes tout en restant accessibles financièrement.

Prenons l'exemple d'Enky, une entreprise de Haute-Loire qui mutualise plusieurs pôles de plasturgie. Anticipant la loi pour une économie circulaire (AGEC) promulguée en février 2020, elle s'est tournée vers le secteur des bioplastiques dits *home compost* et leur injection. Aujourd'hui, sa branche bio-composite connaît une croissance exponentielle. Comme l'affirme son directeur, David Fayolle : *« Nous doublons nos moyens de production chaque année. »*

// On observe aujourd'hui que l'industrie additive, qui regroupe tous les procédés de production par adhésion de couches successives, développe différents modèles économiques encore en cours de stabilisation. Cependant, si l'on se réfère au Trend Report 2024 :

- **Croissance du marché** : Le marché de l'impression 3D est estimé atteindre 57,1 milliards de dollars d'ici la fin de 2028.
- **Augmentation de la production** : 70 % des entreprises interrogées ont imprimé plus de pièces en 2023 qu'en 2022.
- **Réduction des coûts** : 82 % des répondants ont indiqué que l'impression 3D les a aidés à réaliser des économies substantielles.
- **Utilisation pour des pièces finales** : 21 % des participants ont principalement utilisé l'impression 3D pour des pièces destinées à l'utilisation finale en 2023, contre 20 % en 2022.
- **Délai de fabrication** : 47 % des répondants ont choisi l'impression 3D en raison de délais de fabrication plus courts par rapport à d'autres méthodes, une augmentation par rapport aux 44 % de l'année précédente.
- **Impact sur le secteur médical** : 77 % des personnes interrogées estiment que l'impression 3D aura l'impact le plus significatif sur l'industrie médicale.

On observe que l'impression 3D apporte une vraie valeur dans les domaines tels que le médicale ou la réactivité et l'adaptivité son un facteur clefs dans la production de pièces en moyenne série.

Un autre phénomène préoccupant est la prolifération d'une multitude de marques bas de gamme proposant des produits de qualité médiocre, souvent à des prix très attractifs. Ces machines, bien qu'abordables à l'achat, sont généralement conçues avec des matériaux de moindre durabilité et des composants électroniques bas de gamme, ce qui les rend particulièrement vulnérables aux pannes prématurées. Dès qu'un dysfonctionnement survient, l'utilisateur se retrouve face à un dilemme : tenter de réparer son appareil, ce qui peut s'avérer complexe et coûteux, ou simplement le remplacer par un modèle neuf, souvent pour un prix à peine supérieur au coût d'une réparation.

Dans un exemple concret nous pouvons observer la force de réactivité de l'impression. Pendant la pandémie de COVID-19, l'association *Visières Solidaires* a produit près de 300 000 visières pour le personnel médical et les personnes exposées à un risque élevé de contamination. Cela illustre la puissance d'une communauté de *maker* engagés, un objet simple mais essentiel, et un objectif commun : la survie.

Comme l'a souligné Héliox une youtubeuse portée sur le DIY : « Il y a des gens qui possédaient une imprimante 3D mais ne s'en servaient pas. Nous avons également reçu des demandes de conseils pour savoir quelle imprimante acheter afin d'aider. C'est incroyable de voir ce niveau de motivation chez des personnes qui n'avaient jamais touché à une imprimante auparavant. »

Ainsi, l'impression 3D oscille entre outil émancipateur et gadget. Elle peut être une force positive lorsqu'elle répond à des besoins concrets et collectifs, mais elle doit être utilisée de manière consciente pour éviter les excès et les impacts environnementaux inutiles.

Le **Système Reef 2** est un projet innovant visant à imprimer en **taille réelle** le système de ventilation d'un étage entier de l'Université des Sciences de Sydney, en utilisant des **bras robotiques industriels à 6 axes** équipés d'extrudeurs plastiques. Ce projet a mobilisé des techniques avancées de tranchage (**slicing**) comme l'**impression non-planaire** et des **parcours manuels** pour générer des mailles ouvertes.

Il démontre que l'impression 3D peut être un outil puissant même dans des domaines appliqués où elle n'est pas instinctivement perçue comme une solution idéale. Grâce à sa flexibilité, les ingénieurs ont pu réaliser des **simulations précises des flux d'air** afin d'optimiser les conduits et les rendre plus efficaces sans surconsommation de matériaux. Cette approche a permis une réduction de **90 % de l'empreinte carbone** par rapport aux méthodes traditionnelles, tout en assurant un niveau de performance élevé.

De plus, l'utilisation du **PETG**, un polymère en grande partie recyclable, renforce encore l'intérêt écologique du projet. Ce mariage entre **impression 3D, design et ingénierie** illustre parfaitement comment ces disciplines peuvent converger pour concilier **confort humain et conception durable**. L'impression 3D révolutionne ainsi notre manière de concevoir les objets en transformant des simulations numériques en formes tangibles avec une rapidité et une précision inédite, ne laissant plus comme barrière que le coût des matériaux.

Ce gain de temps ouvre un nouvel espace de réflexion où ingénieurs et designers peuvent explorer en profondeur chaque projet, réinventant ainsi notre rapport à la fabrication et au design.

Conclusion

L'impression FDM a pour genèse le projet RepRap, où chacun pouvait apporter sa pierre à l'édifice, ce qui a permis un développement peu coûteux et ouvert à tous. Ce projet avait comme trame de fond une machine hautement automatisée permettant de passer d'un modèle 3D à un objet tangible très rapidement. Dans un contexte européen où la main-d'œuvre est onéreuse, la manufacture additive se présente comme un moyen de se soustraire à ce surcoût, mais cache pourtant une autre réalité.

Cette automatisation est devenue possible grâce à des chercheurs et expérimentateurs talentueux qui, comme les exemples présentés plus haut le montrent, doivent sans cesse adapter ces systèmes aux environnements dans lesquels ils évoluent. Cela nécessite une conception souple et ouverte, permettant une maintenance et une amélioration simples pour le développeur. Les fabricants d'imprimantes ferment peu à peu leurs logiciels pour des raisons économiques ou concurrentielles compréhensibles, mais ils négligent un point important : l'Open Source, qui garantit qu'un système soit libre de distribution et d'amélioration, permet à chaque usager d'adapter l'automatisme à ses besoins tout en contribuant au reste de la communauté. Cette vision favorise également une forte porosité entre les pratiques du numérique et de l'industrie, qui furent autrefois le savoir-faire de la main de l'artisan. Aujourd'hui, cela donne naissance à une sorte d'artisan numérique, qui manipule aussi bien des algorithmes régis par les mathématiques que la matière soumise à des règles physiques.

L'automatisation permet un gain de temps considérable sur les lignes de production. Associée à l'impression 3D, elle offre une souplesse et une réactivité permettant à l'humain de se concentrer sur des sujets tels que la diminution de la quantité de matière consommée, l'ergonomie des objets produits et leur esthétique finale. Libéré de la charge de production, l'humain peut se concentrer sur la conception, à condition d'une approche bienveillante plutôt qu'une logique d'avidité visant à produire plus pour gagner plus. Les fermes d'imprimantes, sortes d'usines composées de plusieurs dizaines de machines FDM, commencent à apparaître et démontrent la viabilité de l'impression à moyenne échelle. Leur avantage est que, dans une époque où la conception assistée par ordinateur et le téléchargement de modèles 3D sur internet se démocratisent, chacun peut produire, par le biais de ces fermes, ses propres séries d'objets. En extrapolant, cela introduit un nouveau concept de production locale, tout en conservant une conception globale permettant un libre échange des objets non physiques et donc une amélioration par la communauté.

Pour la suite de ces recherches, il sera nécessaire de s'intéresser aux nouvelles technologies émergentes du FDM qui apportent une autre échelle, telles que l'impression béton pour les bâtiments ou encore l'impression à l'aide de bras robots industriels, permettant de fabriquer des pièces bien plus grandes, comme le présente le dernier exemple.